

Оценка нахождения реконфигурируемой вычислительной системы в состояниях эффективного функционирования

А.А. Строцев, А.А. Андреев

Южный Федеральный университет, г. Ростов-на-Дону

По состоянию на июнь 2012 года в соответствии с рейтингом и описанием 500 самых мощных общественно известных компьютерных систем мира около 80% суперЭВМ реализованы в рамках архитектуры кластерных вычислительных систем (КВС). Поскольку для обеспечения требуемой вычислительной производительности кластерная архитектура вычислительных систем подразумевает наличие в своём составе достаточно большого числа кластеров (а тем более их узлов), то одним из недостатков таких систем является относительно их невысокая надёжность [1] по показателю вероятности нахождения в состоянии, при котором они соответствуют всем требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации. Поскольку закреплённой в ГОСТ [2] основой для оценки сложных технических систем в условиях риска является аппарат дискретных марковских случайных процессов, а ряд факторов (причин неисправностей) могут не иметь вероятностного описания, то в [3] разработана методика теоретико-игровой оценки нахождения КВС в состояниях эффективного функционирования на основе марковской модели.

С другой стороны, тенденцией развития КВС является постепенный переход от их применения для решения в основном исследовательских и проектировочных задач к применению в различных системах управления реального времени. В таких системах совокупность решаемых задач требует интенсивного информационного обмена, что делает их «сильно связанными». При этом для этого класса задач реальная производительность КВС существенно снижается и не превышает 5-10% от декларируемой пиковой производительности системы [4]. Как показано в [5] – [7], причинами этого является несоответствие архитектуры суперкомпьютера структуре решаемых задач. Для преодоления этого несоответствия в НИИ МВС ЮФУ разработана концепция создания реконфигурируемых вычислительных систем (РВС), т.е. систем с динамически перестраиваемой (перепрограммируемой) архитектурой, позволяющей создавать на её базе структуру проблемно-ориентированных вычислителей, соответствующую структуре решаемой задачи [7], [8]. Поскольку РВС, как и КВС, состоят из большого числа элементов, то задача оценки их надёжности в рамках создания отказоустойчивых вычислительных систем [9], [10] также является важной. Однако непосредственное применение известных методик, например, представленной в [3], невозможно, т.к. они не учитывают структуру проблемно-ориентированных вычислителей, реализуемых в РВС.

Таким образом, разработка методики теоретико-игровой оценки нахождения реконфигурируемой вычислительной системы в состояниях эффективного функционирования на основе марковской модели, учитывающей структуру проблемно-ориентированных вычислителей, является актуальной задачей.

Пусть РВС состоит из базовых модулей M_i , $i = \overline{1, I}$, каждый из которых включает проблемно-ориентированные вычислители C_{ij} , $i = \overline{1, I}$, $j = \overline{1, J_i}$ (описание базовых модулей семейства РВС, состоящих из элементов, в частности, из ПЛИС, модулей памяти SDRAM, подсистемы питания, LVDS-каналов и пр., представлено в [4]).

В соответствие с ГОСТ [2] для описания сложной технической системы в классе марковских процессов необходимо ввести понятие состояния и перечислить все возможные состояния системы. Для этого, как и в [3], обозначим наборы двоичных чисел

разрядности $R = \sum_{i=1}^I J_i$ в виде π_k ($k = \overline{0, K}, K = 2^R - 1$), где каждый r -й разряд ($r = \overline{0, R-1}$) характеризует состояние соответствующего элемента базового модуля РВС: разряд $(R-1)$ – состояние элемента C_{11}, \dots , разряд $(R-J_1)$ – состояние элемента C_{1J_1} , разряд $(R-J_1-1)$ – состояние элемента C_{21}, \dots , 0 разряд – состояние элемента C_{IJ_I} . При этом нулевое значение в разряде обозначает неисправность соответствующего элемента базового модуля РВС, а единичное – его работоспособное состояние.

Однако в отличие от методики, рассмотренной в [3] для КВС, под состоянием РВС нельзя понимать совокупность состояний её любых отдельных элементов, и представить конечное множество состояний РВС выражением

$$\hat{S} = \{ \hat{S}_{\pi_0}, \hat{S}_{\pi_1}, \dots, \hat{S}_{\pi_k}, \dots, \hat{S}_{\pi_K} \},$$

поскольку такая формализация не будет отражать учёт структуры РВС.

Для такого учёта: 1) под элементами базовых модулей будем понимать их конструктивные элементы, которые при поиске и устранении неисправности базового модуля подлежат оперативной замене; 2) положим, что для решения задачи в РВС формируется V проблемно-ориентированных вычислителей – $ПОВ_v$, $v = \overline{1, V}$; 3) введём в рассмотрение множества $L_v = \{ l_v : (i, j_i)_{l_v}, l_v = \overline{1, \overline{L}_v}, C_{ij_i} \in ПОВ_v \}$, $v = \overline{1, V}$, где $C_{ij_i} \in ПОВ_v$ означает принадлежность j_i -го элемента базового модуля M_i v -му проблемно-ориентированному вычислителю.

Тогда можно определить наборы двоичных чисел разрядности V в виде ρ_z , $z = \overline{0, Z}, Z = 2^V - 1$, где каждый b -й разряд ($b = \overline{0, V-1}$) характеризует состояние соответствующего проблемно-ориентированного вычислителя РВС: 0 разряд – состояние вычислителя $ПОВ_1, \dots$, разряд $(V-1)$ – состояние вычислителя $ПОВ_V$. При этом нулевое значение в разряде обозначает неисправность соответствующего проблемно-ориентированного вычислителя, а единичное – его работоспособное состояние.

Тогда под состоянием РВС, учитывающим структуру проблемно-ориентированных вычислителей, можно понимать совокупность их состояний, каждое из которых определяется состоянием элементов из соответствующего множества L_v , $v = \overline{1, V}$. В свою очередь, конечное множество состояний РВС определяется выражением

$$S = \{ S_{\rho_0}, S_{\rho_1}, \dots, S_{\rho_z}, \dots, S_{\rho_Z} \}, \quad (1)$$

Состояния S_{ρ_z} , $z = \overline{0, Z}$ образуют R групп с признаком принадлежности к группе G_g , $g = \overline{0, R-1}$ по общему числу единиц в двоичном числе ρ_z , равном g . Группы, отличающиеся по номеру на единицу, являются соседними. Множество, образованное парами соседних состояний, обозначим S^c .

На основе анализа функционирования РВС может быть получен граф состояний (диаграмма состояний-переходов) $\Gamma = (S, U)$, U – множество дуг графа, с интенсивностями переходов $\lambda_{z_1 z_2}$, $(z, z_1) \in \overline{Z} = \{ (z, z_1) : S_{\rho_z}, S_{\rho_{z_1}} \in S^c, z = \overline{0, Z}, z_1 = \overline{0, Z} \}$, учитывающими действие случайных факторов.

Во множестве S можно выделить подмножество состояний S_g , обеспечивающих эффективное функционирование РВС в системе управления реальным временем с учётом отказоустойчивости, т.е. состояний, обеспечивающих удовлетворения требований к ней с заданными количественными характеристиками. В этом случае показателем эффективности РВС может являться стационарная (предельная) вероятность нахождения системы в одном из состояний из множества S_g .

Тогда в условиях, определяющих возможность существования стационарных вероятностей нахождения системы в соответствующих состояниях $P_z = P(S_{\rho_z})$, $z = \overline{0, Z}$ (представленных, например, в [11]), искомая оценка может быть получена по выражению

$$P(S_g) = \sum_{\substack{z=0 \\ S_{\rho_z} \in S_g}}^Z P_z, \quad (2)$$

а для нахождения $P_z = P(S_{\rho_z})$, $z = \overline{0, Z}$ необходимо решение системы алгебраических уравнений вида:

$$-P_z \sum_{\substack{z_1=0 \\ (z, z_1) \in \overline{Z}}}^Z \lambda_{zz_1} + \sum_{\substack{z_1=0 \\ (z_1, z) \in \overline{Z}}}^Z P_{z_1} \lambda_{z_1 z} = 0, \quad z = \overline{0, Z}; \quad \sum_{z=0}^Z P_z = 1. \quad (3)$$

Для получения оценки стационарной вероятности нахождения РВС в одном из состояний её эффективного функционирования по выражениям (2), (3) необходимо знание интенсивностей λ_{zz_1} .

Однако, при переходе из состояний, входящих в группу G_g , в состояния из группы G_{g-1} возможны ситуации, для которых неисправность соответствующего проблемно-ориентированного вычислителя связана с несколькими причинами, определяемыми неисправностью элементов из соответствующего ему множества L_v , $v = \overline{1, V}$. При этом локализация неисправности (действия, направленные на идентификацию неисправной составной части или нескольких составных частей на соответствующем уровне разукрупнения [12]) однозначно влечёт и устранение этой неисправности. Например, локализация неисправности проблемно-ориентированного вычислителя осуществляется путём последовательной замены обеспечивающих его работу элементов базовых модулей (из соответствующего ему множества L_v , $v = \overline{1, V}$), рассматриваемых в качестве причин неисправности, на достоверно работоспособные. Обозначим множество пар таких состояний через S^{CH} . Тогда, если $s_{\rho_{z_1}}, s_{\rho_{z_2}} \in S^{CH}$, $s_{\rho_{k_1}} \in G_g$ и $s_{\rho_{z_2}} \in G_{g-1}$, то интенсивность перехода $\lambda_{z_2 z_1}$ из состояния $s_{\rho_{z_2}}$ в состояние $s_{\rho_{z_1}}$ неизвестна, т.к. зависит от стратегии локализации-устранения неисправности и её причины. Если вероятности появления этих причин неизвестны или их оценки статистически не достоверны, то можно воспользоваться теоретико-игровым подходом, который является гарантированным в смысле достижения ситуации равновесия в антагонистической игре с матрицей выигрышей первого игрока

$$\Lambda_{\rho_{z_2}, \rho_{z_1}} = \left\| \lambda_{i_{\rho_{z_2}, \rho_{z_1}} j_{\rho_{z_1}, \rho_{z_2}}} \right\|_{I_{\rho_{z_2}, \rho_{z_1}} J_{\rho_{z_1}, \rho_{z_2}}}. \quad (4)$$

Решение игры в чистых стратегиях (при наличии седловой точки в матрице (4)) позволяет определить искомую интенсивность в виде:

$$\lambda_{i_{\rho_{z_2}, \rho_{z_1}}^* j_{\rho_{z_1}, \rho_{z_2}}^*} = \max_{i_{\rho_{z_2}, \rho_{z_1}}} \min_{j_{\rho_{z_1}, \rho_{z_2}}} \lambda_{i_{\rho_{z_2}, \rho_{z_1}} j_{\rho_{z_1}, \rho_{z_2}}} = \min_{j_{\rho_{z_1}, \rho_{z_2}}} \max_{i_{\rho_{z_2}, \rho_{z_1}}} \lambda_{i_{\rho_{z_2}, \rho_{z_1}} j_{\rho_{z_1}, \rho_{z_2}}}. \quad (5)$$

Если равенство (5) не выполняется, то решение игры $X^* = \arg \max_X \left(\min_Y \tilde{H}^{\rho_{z_2}, \rho_{z_1}}(X, Y) \right)$, $Y^* = \arg \min_Y \left(\max_X \tilde{H}^{\rho_{z_2}, \rho_{z_1}}(X, Y) \right)$,

$\tilde{H} = \sum_{i_{\rho_{z_2}, \rho_{z_1}}=1}^{I_{\rho_{z_2}, \rho_{z_1}}} \sum_{j_{\rho_{z_1}, \rho_{z_2}}=1}^{J_{\rho_{z_1}, \rho_{z_2}}} \lambda_{i_{\rho_{z_2}, \rho_{z_1}} j_{\rho_{z_1}, \rho_{z_2}}} \xi_{i_{\rho_{z_2}, \rho_{z_1}}} \eta_{j_{\rho_{z_1}, \rho_{z_2}}}$ может быть получено на множествах смешанных стратегий M_ξ , M_η ($X \in M_\xi$, $Y \in M_\eta$, $X = (\xi_1 \xi_2 \dots \xi_n)^T$, $\xi_i \geq 0$, $i = \overline{1, n}$, $Y = (\eta_1 \eta_2 \dots \eta_m)^T$,

$\eta_j \geq 0, j = \overline{1, m}, \sum_{i=1}^n \xi_i = 1, \sum_{j=1}^m \eta_j = 1$) как результат решения прямой и двойственной задач линейного программирования [4].

При этом в качестве оценки неизвестной интенсивности $\lambda_{z_2 z_1}$ принимается её математическое ожидание $\tilde{H}^{\rho_{z_2}, \rho_{z_1}}(X^*, Y^*)$.

Тогда методика может быть представлена в виде следующей последовательности операций:

1. Формирование множества S состояний РВС (1).
2. Оценка состояний по эффективности функционирования РВС в системе управления реальным временем, учитывающая структуру проблемно-ориентированных вычислителей, и определение множества S_s .
3. Формирование диаграммы состояний-переходов и определение множества s^{ch} пар состояний с неизвестными интенсивностями переходов.
4. Решение теоретико-игровых задач, определяемых матрицами (4) для всех пар индексов из множества s^{ch} , с получением оценок неизвестных интенсивностей переходов в виде значений интенсивностей (5) или их математических ожиданий $\tilde{H}^{\rho_{z_2}, \rho_{z_1}}(X^*, Y^*)$.
6. Решение системы линейных алгебраических уравнений (3) относительно предельных вероятностей нахождения системы в состояниях из множества S .
7. Определение оценки вероятности нахождения кластерной вычислительной системы в состояниях эффективного функционирования по выражению (2).

Таким образом, разработанная методика позволяет получить гарантированную в теоретико-игровом смысле оценку нахождения реконфигурируемой вычислительной системы в состояниях эффективного функционирования в системах управления реальным временем, учитывающей структуру проблемно-ориентированных вычислителей, при деградации её структуры в результате отказов отдельных элементов базовых модулей.

Кроме того, на основе полученных оценок могут быть реализованы алгоритмы оптимизации процессов поиска и устранения дефектов РВС. Для малого числа реализаций игровой ситуации применимы модели и методы решения смешанного расширения матричных игр неклассического типа, представленные в [13].

Литература:

1. Наумов А. Блейд-система T-Blade 2 // СуперКомпьютеры, 2010. – № 1. – С. 46, 47.
2. ГОСТ Р 51901.15-2005 Менеджмент риска. Применение марковских методов. – М.: Стандартинформ, 2005.
3. Строцев А.А. Методика теоретико-игровой оценки нахождения кластерной вычислительной системы в состояниях эффективного функционирования на основе марковской модели // В сб. «Суперкомпьютерные технологии (СКТ-2012) // Материалы 2-й Всероссийской научно-технической конференции. – Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета, 2012. – 410 с». – С. 192 – 196.
4. Дмитренко Н.Н., Каляев И.А., Левин И.И., Семерников Е.А. Реконфигурируемые вычислительные системы для решения вычислительно трудоёмких задач // В сб. «Труды Всероссийской научной конференции (22-27 сентября 2008 г., г. Новороссийск).- М.: Изд-во МГУ, 2008. - 468 с. ISBN 978-5-211-05616-9» . – С. 265 – 270.
5. Алдышев О.С., Дикарев Н.И., Овсянников А.П. и др. СуперЭВМ: области применения и требования к производительности // Известия ВУЗов. Электроника, 2004. – №1. – С.13–17.
6. Воеводин В.В., Воеводин Вл.В. Параллельные вычисления. –С.-Пб.: «БХВ-Петербург», 2002. –599 с.

7. Каляев И.А., Левин И.И. Модульно-наращиваемые многопроцессорные системы со структурно-процедурной организацией. – М.: Янус-К, 2003. – 380 с.
8. Каляев И.А., Левин И.И. Семерников Е.А., Шмойлов В.И. Реконфигурируемые мультиконвейерные вычислительные структуры / Под ред. И.А. Каляева. – Ростов-на-Дону: Издательство ЮНЦ РАН, 2008. – 320 с.
9. Авиженис А. Отказоустойчивость – свойство, обеспечивающее постоянную работу цифровых устройств // ТИИЭР, 1978. – Т.66. – №10. – С. 5–25.
10. Катаев О. В. Методология проектирования отказоустойчивых вычислительных систем // В сб. «Суперкомпьютерные технологии (СКТ-2012) // Материалы 2-й Всероссийской научно-технической конференции. – Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета, 2012. – 410 с». – С. 220 – 224.
11. Макаров Ю.Н., Строцев А.А. Методология исследования сложных организационно-технических систем, функционирующих в конкурентной среде при ограниченных ресурсах. Монография. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2010. – 132 с.
12. ГОСТ Р 27.002-2009 (Р 53480-2009). Надёжность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2011.
13. Строцев А.А. Построение смешанного расширения матричной игры «неклассического» типа // Изв. РАН. Теория и системы управления. – 1998. – № 3. – С. 119–124.